



УДК 532.5; 628.16

САТАЕВ А. А., канд. техн. наук, доц. кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, Н. А. ИВАНОВ, студент

## РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ГИДРОЦИКЛОНА С ЦЕЛЬЮ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева»

Россия, 603155, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24.

Тел.: (831) 436-80-29; эл. почта: sancho\_3685@mail.ru; ivanov.supern@yandex.ru

*Ключевые слова:* гидроциклон, очистка, геометрические параметры, CFD.

---

*Рассмотрен вопрос подбора наиболее эффективных геометрических параметров аппаратов циклонного типа для очистки загрязненной воды. Выполнена работа по оптимизации конструкции гидроциклона с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). На основании эксперимента принятая модель была также верифицирована.*

---

### Введение

Чистая вода является важным и незаменимым ресурсом для поддержания разнообразных технологических процессов. Она используется во многих отраслях промышленности, таких как: производство, энергетика, сельское хозяйство, а также в бытовых нуждах.

В производственных процессах чистая вода используется для различных целей, включая охлаждение оборудования, промывку деталей, приготовление растворов и смесей, а также для обеспечения чистоты и гигиены на рабочем месте. Важность чистой воды заключается в том, что она обеспечивает качество и стабильность технологических процессов, предотвращая появление нежелательных примесей и загрязнений. Это, в свою очередь, способствует повышению эффективности работы оборудования и снижению риска возникновения поломок.

Одним из самых простых способов очистки воды является использование аппаратов циклонного типа, которые работают на основе центробежной силы. Гидроциклоны нашли применение во многих отраслях промышленности, среди них: металлургия, нефтяная, угольная, пищевая, целлюлозно-бумажная промышленность [1].

Вопрос оптимизации и подбора наиболее эффективных геометрических параметров аппаратов циклонного типа является крайне актуальным сейчас. Его решение позволит увеличить эффективность всей установки в целом.

По данной тематике стоит отметить работы [2–7]. В работе [2], например, было выяснено, что имеется зависимость эффективности очистки от радиуса  $R_c$  и высоты цилиндрической части  $H$  гидроциклона. А в работе [4], выполненной с помощью *CFD* кодов, результаты показали, что на производительность гидроциклонов существенное влияние оказывает только коническая фильтрующая стенка.



Целью данной работы является создание гидроциклона с высокой эффективностью очистки. Задачи данной работы заключаются в подборе наиболее эффективных геометрических параметров посредством методов вычислительной гидродинамики (*CFD* кодов), проверка эффективности данного аппарата путем эксперимента и поиск конструктивных элементов, которые снижают эффективность работы, с целью их оптимизации.

### Методика выполнения работы

#### Описание методики расчетного исследования

Проектирование гидроциклона и моделирование процесса фильтрации в нем осуществлялось поэтапно с помощью пакета вычислительной гидродинамики *Solidworks Flow Simulation*. Расчетной моделью была принята I-L. В качестве частиц, которые подвергались очистке, были выбраны песок и оксид железа (FeO), их характеристики показаны в табл. 1. Изначально производился расчет основного потока жидкости, затем на него посредством функции «Расчет движения частиц» накладывалось движение частиц песка в этом потоке жидкости.

Таблица 1

#### Твердые частицы, использованные в работе

| Частица | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Диаметр, мкм |
|---------|------------------------------|--------------|
| Песок   | 1,585                        | 50–150       |
| FeO     | 7,874                        | 75           |

На каждом этапе расчета выбирался один геометрический параметр, путем его подбора из них выбирался наилучший посредством проверки эффективности очистки при заданных параметрах. Далее, на основе лучшего параметра осуществлялась дальнейшая работа.

Начальные данные для проведения расчетов, приведены в табл. 2:

Таблица 2

#### Начальные данные

| Начальные данные         | Значение параметра |
|--------------------------|--------------------|
| Давление на входе [бар]  | 2,5                |
| Расход воды [л/мин]      | 20                 |
| Концентрация песка [г/л] | 2                  |

В данной работе были исследованы следующие параметры, которые отображены на рис. 1 и рис. 2:

1. Угол конуса  $\alpha$
2. Высоты вертикальной проставки ( $H$ )
3. Высота внутренней части выходного патрубка ( $L$ )
4. Угол входного патрубка  $\beta$

**К СТАТЬЕ А. А. САТАЕВА, Н. А. ИВАНОВА  
«РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ГИДРОЦИКЛОНА С ЦЕЛЬЮ ПОДБОРА  
ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ»**

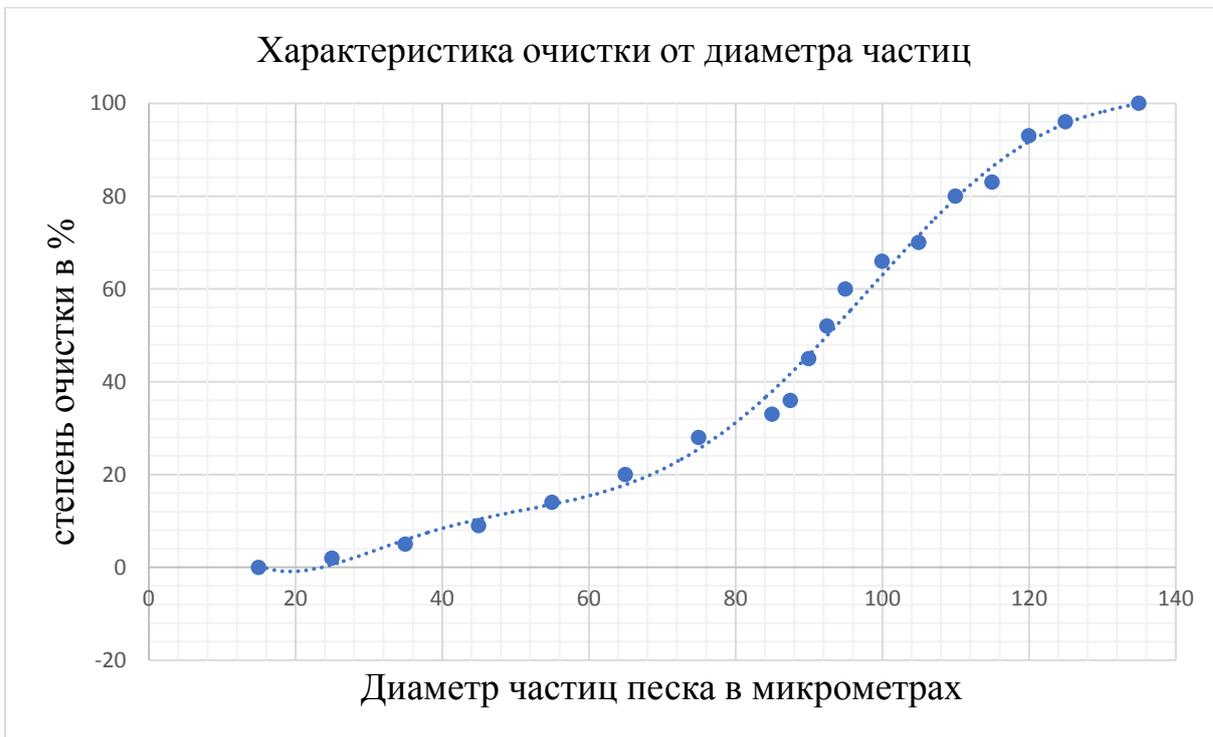


Рис. 1. График характеристики очистки от диаметра частиц

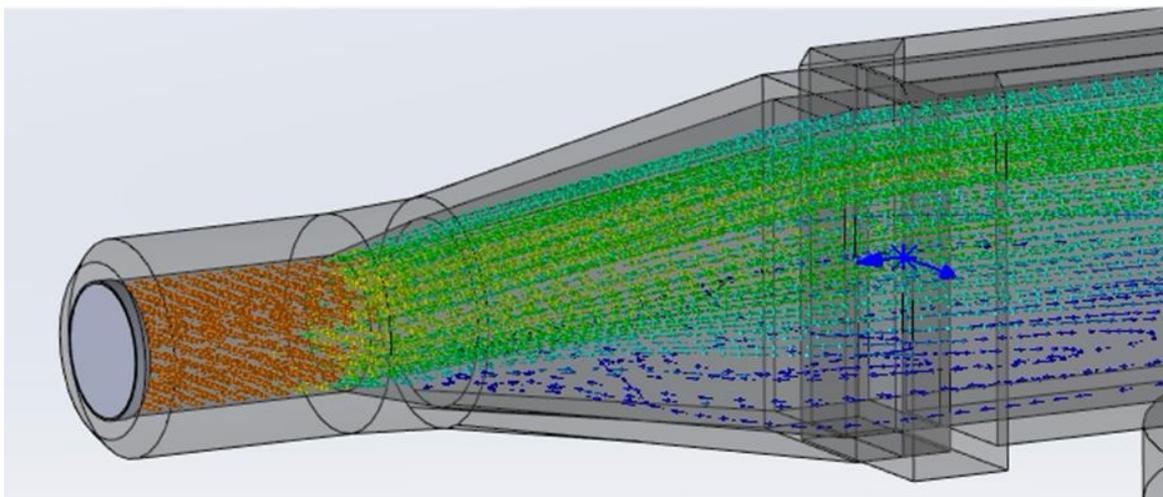


Рис. 2. Вихреобразование в циклонном аппарате

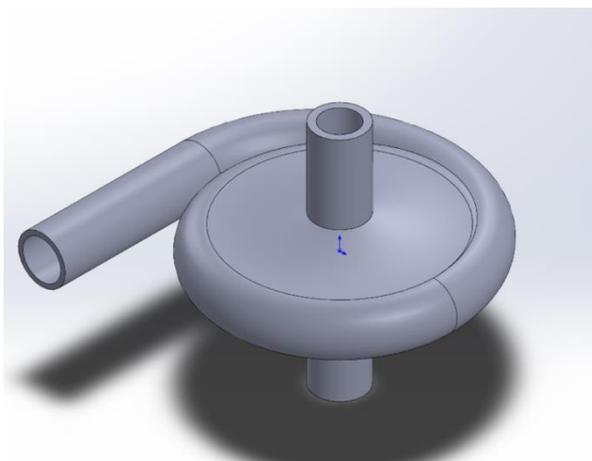


Рис. 3. Новая конструкция входного аппарата

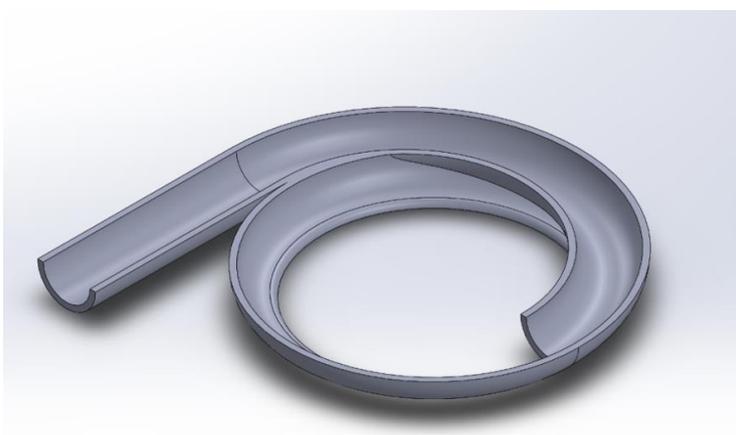


Рис. 4. Разрез нового входного аппарата

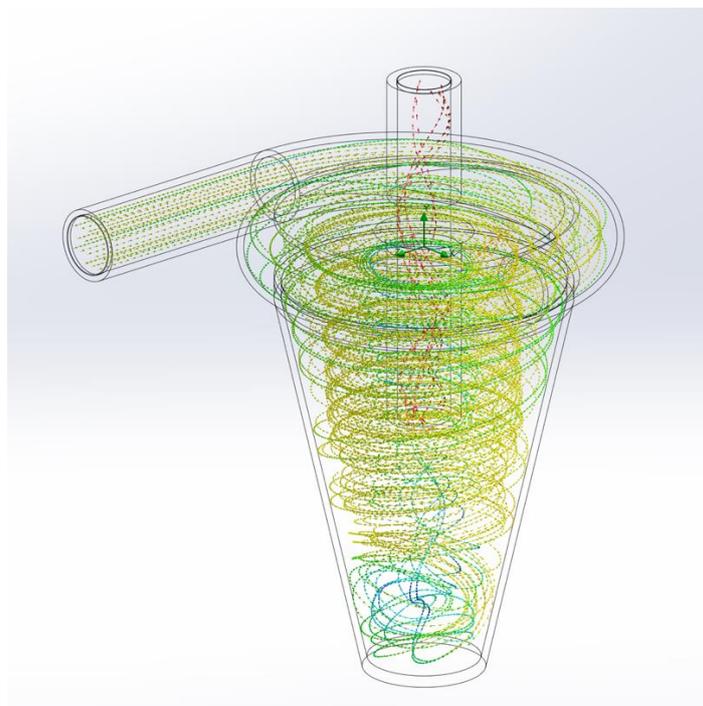


Рис. 5. Визуализация потока жидкости в гидроциклоне с модернизированным входным аппаратом

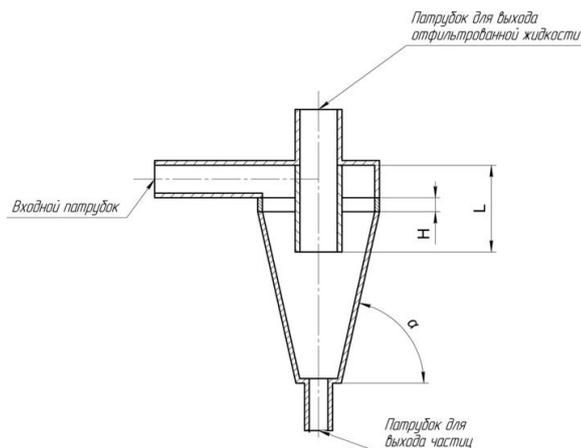
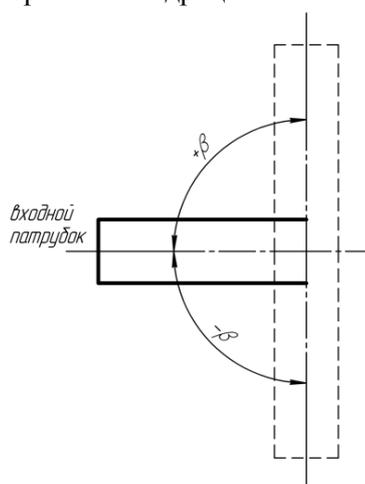


Рис. 1. Схематическое изображение гидроциклона и его параметров

Рис. 2. Изображение угла наклона  $\beta$  входного патрубка

### **Описание стенда для верификации данных расчетного исследования**

Для удобства проведения эксперимента вместо частиц песка были использованы частицы оксида железа, характеристики приведены в табл. 1. Для расчета диаметра металлической частицы с массой равной частице песка использовалась формула 1.

$$d_{\text{ж}} = \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{п}} \cdot d_{\text{п}}^3}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{ж}}$  и  $d_{\text{п}}$  – диаметры частиц железа и песка соответственно,  $\rho_{\text{ж}}$  и  $\rho_{\text{п}}$  плотности частиц железа и песка.

Экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 3, содержит: бак с жидкостью, в котором имеется исходная жидкость объемом 100 л и 200 г частиц, которые соответствуют объемной плотности содержания 2 г/л, циркуляционный насос, имеющий байпас для регулировки расхода, датчик давления, расходомер, итоговый вариант гидроциклона, произведенный на основе параметров, полученных при расчетном моделировании, магнитный фильтр с неодимовым магнитом внутри для задержания частиц, которые не прошли сепарацию.

Процесс циркуляции в экспериментальном стенде осуществлялся следующим образом: вода с примесью оксида железа перекачивается насосом из бака в гидроциклон, в гидроциклонном аппарате происходит разделение воды и



оксида железа, затем частицы FeO поступают вниз на слив, а вода уходит вверх и попадает в магнитный фильтр, предназначенный для окончательной остановки частиц оксида железа, которые не прошли процесс отсева в гидроциклоне. После магнитного фильтра очищенная вода снова попадает в исходный бак для продолжения процесса дальнейшей сепарации.

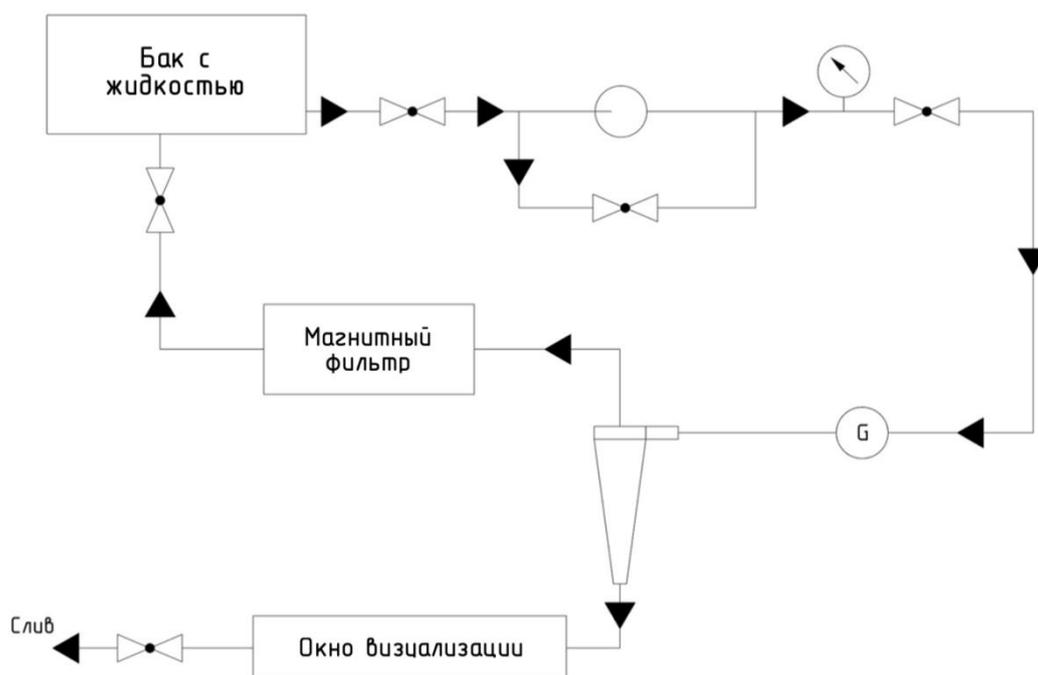


Рис. 3. Схема установки

### Результаты

В ходе теоретического исследования удалось спроектировать гидроциклон со следующими геометрическими параметрами, табл. 3:

Таблица 3

#### Геометрические параметры, полученные в ходе теоретического исследования

| Параметры   | Значения |
|---|----------|
| Угол конуса $\alpha$ , градус                       | 77,5     |
| Высоты вертикальной проставки $H$ (мм)              | 5        |
| Высота внутренней части выходного патрубка $L$ (мм) | 0 (60)   |
| Угол входного патрубка $\beta$ , градус             | 0°       |

Характеристика очистки данного сепаратора при начальных параметрах (см. табл. 2) приведена на рис. 1 цв. вклейки.

На основании графика находим точку начала 100 % сепарации и по формуле 1 рассчитываем диаметр частиц для проведения эксперимента:

$$d_{ж} = \sqrt[3]{\frac{\rho_{п} \cdot d_{п}^3}{\rho_{ж}}} = \sqrt[3]{\frac{1,585 \cdot 135^3}{7,874}} = 79 \text{ мкм.}$$

По итогам экспериментального исследования в магнитном фильтре оказалось: 1 грамм металлических частиц, соответственно 199 грамм не прошли, исходя из этого степень очистки аппарата составила 99,5 %. В результате эксперимента подтвердилась эффективность данного гидроциклона, что может



свидетельствовать о достоверности данных, полученных в ходе теоретического исследования.

### Обсуждение

После проведения расчетного исследования, при визуализации потоков было замечено, что при переходе из круглого сечения трубы в прямоугольное сечение входного аппарата гидроциклона возникает сильное вихреобразование, показанное на рис. 2 цв. вклейки. Для устранения этого можно изменить конструкцию входного аппарата, чтобы устранить прямоугольные сечения в нем. Новая конструкция приведена на рис. 3 и рис. 4. цв. вклейки.

При расчете по вышеуказанной методике получаем положительный результат, см. табл. 4, а именно:

1. Исчезновение зоны во входном аппарате с вихреобразованием.
2. Снижение на 38 % минимального диаметра частиц, с которого предполагаемо начинается 100 % сепарация.
3. Снижение статического напряжения на стенках входного устройства.

Таблица 4

### Сравнение результатов конструкций аппаратов циклонного типа

| Характеристика  | Исходная конструкция | Вариант с новым входным устройством |
|---|----------------------|-------------------------------------|
| Минимальный диаметр частицы песка [мкм]                     | 130                  | 80                                  |
| Максимальное напряжение на стенке входного устройства [МПа] | 7,734                | 1,506                               |
| Концентрация песка [г/л]                                    | 3                    |                                     |

### Заключение

Таким образом, по результатам работы отмечена важность и актуальность создания и оптимизации уже существующих аппаратов циклонного типа. Эксплуатация низкоэффективных гидроциклонов может снизить надежность и потребительские качества установки, в которой он используется. Следовательно, решение этих задач следует выполнять комплексно, применяя по возможности как лабораторные методы в виде эксперимента, так и современные методы расчета в виде *CFD* кодов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бауман, А. В. Гидроциклоны теория и практика / А. В. Бауман. – Новосибирск : Сибпринт. – 2020. – 56 с. – ISBN 978-5-94301-812-1. – Текст : непосредственный.
2. Теоретическое обоснование влияния геометрических параметров цилиндрикоконического гидроциклона на степень очистки отработанных смазочных масел от нерастворимых примесей / А. Н. Зазуля, А. А. Глущенко, Д. Е. Молочников [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2019. – № 2 (38). – С. 116–123
3. Optimizing Geometric Parameters in Hydrocyclones for Enhanced Separations : A Review and Perspective / Long Ni, Jinyi Tian, Tao Song [et al.] // Separation and purification reviews. – 2018. – P. 30–51.



4. Influence of geometric dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone : an experimental and cfd study / D. C. Oliveira, C. A. K. Almeida, L. G. M. Vieira [et al.] // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2009. – № 3. – P. 575–582.

5. Анализ влияния геометрических размеров выхлопной трубы циклона на степень его очистки с помощью компьютерного моделирования / И. И. Чемезов, Г. Е. Леченко, К. Р. Волков [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник евразийской науки. – 2020. – Том 12, № 4. – 20 с.

6. Буров, А. С. Численное исследование двухфазного закрученного течения в прямоточном циклоне. Механика жидкости, газа и плазмы : специальность 01.02.05. – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Буров Артем Сергеевич. – Казань, 2016. – 22 с. – Текст : непосредственный.

7. Белоусов, А. С. Влияние геометрических параметров элементов циклона на структуру потоков / А. С. Белоусов, В. Ю. Абрамин. – Текст : непосредственный // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности. Инновации-2020 : международная научно-техническая конференция, 12 ноября 2020 г. : сборник материалов / Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина. Технологии. Дизайн. Искусство. – Москва, 2020. – Часть 3. – С. 40–44.

**SATAEV Aleksandr Aleksandrovich candidate of technical sciences, associate professor of the chair of nuclear reactors and power plants; IVANOV Nikita Alekseevich, student;**

### **CALCULATION AND EXPERIMENTAL MODELING OF THE HYDROCYCLONE FILTRATION PROCESS FOR THE SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS**

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University. 24, Minina str., Nizhny Novgorod, 603155, Russia. Tel.: (831) 436-80-29; e-mail: sancho\_3685@mail.ru; ivanov.supern@yandex.ru

*Key words:* Hydrocyclone, purification, geometric parameters, CFD.

---

*The article discusses the issue of selecting the most effective geometric parameters of cyclone-type devices for purifying contaminated water. Work has been carried out to optimize the design of a hydro cyclone using computational fluid dynamics (CFD) methods. Based on the experiment, the adopted model was also verified.*

---

### REFERENCES

1. Bauman, A. V. Hydrocyclones theory and practice [Text] / A. V. Bauman // Novosibirsk: Sibprint, 2020 — 56 p.

2. Theoretical justification of the influence of the geometric parameters of the cylindrical-conical hydrocyclone on the degree of purification of used lubricating oils from insoluble impurities / A. N. Zazulya, A. A. Glushchenko, D. E. Molochnikov [et al.] // Science in Central Russia. – 2019. – No. 2(38). – P. 116-123.

3. Long Ni, Jinyi Tian, Tao Song, Yongson Jong & Jianing Zhao Optimizing Geometric Parameters in Hydrocyclones for Enhanced Separations: A Review and Perspective [Text] / Long Ni, Jinyi Tian, Tao Song, Yongson Jong & Jianing Zhao // Separation and purification reviews. — 2018; P. 30-51.

4. D. C. Oliveira, C. A. K. Almeida, L. G. M. Vieira, J. J. R. Damasceno and M. A. S. Barrozo Influence of geometric dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: an experimental and cfd study [Text] / D. C. Oliveira, C. A. K. Almeida,



L. G. M. Vieira, J. J. R. Damasceno and M. A. S. Barrozo // Brazilian Journal of Chemical Engineering. — 2009. — No. 3. — P. 575 - 582.

5. Analysis of the influence of the geometrical dimensions of the cyclone exhaust pipe on the degree of its purification using computer simulation / I. I. Chemezov, G. E. Lechenko, K. R. Volkov [et al.] // Bulletin of Eurasian Science. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 20.

6. Burov, A. S. Numerical study of two-phase swirling flow in a straight-through cyclone: specialty 01.02.05 "Fluid mechanics, gas and plasma": dissertation abstract for the degree of candidate of technical sciences / Burov Artem Sergeevich. – Kazan, 2016. – 22 p.

7. Belousov, A. S. Influence of geometric parameters of cyclone elements on flow structure / A. S. Belousov, V. Yu. Abramini // Design, technologies and innovations in textile and light industry (INNOVATIONS-2020): Collection of materials of the International scientific and technical conference, Moscow, November 12, 2020. Volume Part 3. – Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art)", 2020. – P. 40-44.

© **А. А. Сатаев, Н. А. Иванов, 2024**

Получено: 15.07.2024 г.